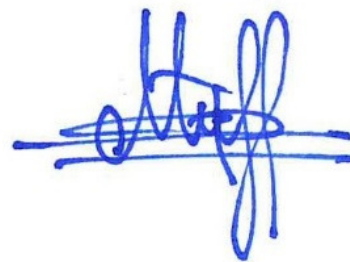


На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned above the author's name.

МИРСАЙТОВ ФАНИС НАИЛЕВИЧ

**РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ
РОТОРА ГАЗОТУРБИННОГО АВИАДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Болознев Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: **Данилин Александр Иванович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО
«Самарский государственный аэрокосмический
университет им. С.П. Королёва»,
заведующий кафедрой радиотехники;

Смольский Сергей Михайлович,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», профессор кафедры формирования и
обработки радиосигналов

Ведущая организация: ОАО «Конструкторско-производственное
предприятие «Авиамотор» (г. Казань).

Защита состоится 26 декабря 2014 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.11 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32, ауд. Р-217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
<http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Зраенко Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие теории и техники ближней радиолокации (БРЛ) связано с появлением новых и расширением существующих областей применения. Появились новые виды БРЛ: сверхширокополосная, ближнепольная, подповерхностная. Усложняется структура зондирующих сигналов. Вводятся нетрадиционные критерии эффективности. Возрастает значимость учёта особенностей объекта локации.

Особое место в ряду применений ближней радиолокации занимают средства контроля различных технологических процессов. Здесь возникают специфичные ограничения в выборе частотного диапазона и закона модуляции зондирующего излучения, учёта геометрии объекта контроля, и радиолокационной доступности (условий распространения радиоволн), конструктивного, и функционального сопряжения с объектом, в том числе, с установленной на нём контрольной (диагностической) аппаратурой.

При создании таких радиолокационных средств (РЛС) традиционные методы исследования и расчёта не всегда применимы. В этом отношении не является исключением одно из важнейших направлений применения радиолокационных методов – их использование для диагностики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

Процесс совершенствования методов и средств функционального (полётного) диагностирования авиационных ГТД как серийных, так и находящихся в стадии разработки, затруднён вследствие следующих причин:

- невысокой контролепригодности ГТД, включая полную невозможность оперативного контроля некоторых параметров и поиска неисправностей;
- высокой стоимости надёжных средств диагностирования;
- низкой степени организации обработки диагностической информации, включая её доставку и ввод в бортовой компьютер;
- отсутствие (или запаздывание) обратной связи.

Хотя доля общего числа авиапроисшествий из-за отказов ГТД невелика (примерно 20%), их последствия – наиболее тяжёлые. Основная часть этих отказов приходится на проточный тракт ГТД – компрессор и турбину, причём перечень возникающих здесь неисправностей включает 35 позиций. Трудями отечественных и зарубежных учёных: Баркова А.В., Заблоцкого И.Е., Кебы И.В., Коростелёва Ю.А., Степаненко В.П., Шипова Р.А., Якобсона П.П., Carrington I.B., Cooper J.E., Dimitriadis G., Ewins D.J., Heath S., Hohenberg R., Holz R.G., Slater T., Robinson R.A., Stivenson R.E., Wright J.R., Zielinski M. выявлены причины и формы колебаний лопаток турбины и компрессора. В частности показано, что по спектру этих колебаний можно судить не только о состоянии рабочих колёс, но и о значительной части неисправностей других узлов проточного тракта.

В настоящее время предложены и разработаны методы бесконтактного измерения регулярных и вибрационных перемещений лопаток – тензометрические, магнитные, ёмкостные, индуктивные, оптические (Боришанский К.Н., Данилин А.И., Заблоцкий И.Е., Коростелёв Ю.А., Усанов Д.А., Шипов Р.А., Carrington I.B., Cooper J.E., Dimitriadis G., Ewins D.J., Heath S.,

Hohenberg R., Holz R.G., Robinson R.A., Slater T., Stivenson R.E., Wright J.R., Zielinski M. и др.). Серьёзным преимуществом этих технических решений следует считать использование (хотя и не всегда явное) вращения ротора для формирования измерительного сигнала (так называемого «дискретно-фазового метода»), что весьма существенно для помехозащищённости. Но реализация этих предложений требует препарирования ГТД и поэтому непригодна в функциональной диагностике.

Более перспективной представляется точка зрения А.И. Данилина о создании радиолокационной диагностической системы, «в первичном преобразователе которой функционально и конструктивно интегрированы объект контроля, источник и приемник излучения радиодиапазона, а также электронные узлы первичной обработки». Реализация этой идеи возможна средствами ближней (БРЛ) или ближнепольной (БПРЛ) радиолокации с применением малоразмерных антенн, автодинных приёмопередатчиков (В.Я. Носков, С.Д. Воторопин) и – для помехозащищённости – с частотно-модулированным излучением (И.В. Комаров, С.М. Смольский).

В связи со сказанным, дальнейшее развитие исследований в данной области является актуальным.

Объект диагностики. Проточный тракт авиационного газотурбинного двигателя (ГТД).

Предмет исследования. Структура и динамические характеристики вибродиагностической системы ближней радиолокации, включая автодинный приёмопередатчик.

Диагностический параметр. Состав и форма огибающей спектра регулярных и вибрационных перемещений лопаток компрессора и турбины.

Диагностический признак. Аномалии (рост дисперсии и изменение формы огибающей) в спектре.

Цель работы. Исследование, разработка научно-обоснованного метода и реализующего этот метод локатора БРЛ для функциональной диагностики роторов, и других узлов современных ГТД по вибрациям лопаток турбины, и компрессора в процессе полёта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

Решаемые задачи.

1. Разработка новых и доработка известных физических принципов радиолокационного способа функциональной диагностики, диагностического алгоритма и структуры диагностической системы. Выбор наиболее пригодного в условиях полёта диагностического параметра, и уточнение перечня диагностических признаков.

2. Исследование структуры электромагнитного поля, возбуждаемого в объёме проточного тракта, и её зависимости от типа антенны, а также от регулярных и аномальных параметров рабочего процесса.

3. Построение физической модели вибродатчика автодинного типа, анализ динамических процессов. Спектральный анализ диагностического отклика и выявление в нём диагностических признаков.

4. Выработка информационного критерия контролеспособности диагностических средств, его количественная оценка. Выявление и минимизация помеховых откликов, порождённых специфическими факторами в проточном тракте.

5. Модернизация, в применении к виброконтролю, ранее запатентованной диагностической системы, схемы и конструкции датчика.

Методы исследования. Методы функциональной диагностики авиадвигателей; численные методы моделирования в электродинамике: метод моментов, многоуровневый быстрый метод многополюсников, метод тензорных функций Грина, решение системы линейных алгебраических уравнений методом исключения Гаусса, разложение электромагнитных полей по поперечным волновым числам, теория возмущений, методы численного интегрирования; теория нелинейных колебаний, включая спектрально-корреляционный анализ колебательных процессов; теория и методы проектирования РЛС с частотной модуляцией; теория извлечения и передачи информации; среда объектного программирования LabView для моделирования динамики процессов.

Научная новизна.

1. Разработан и научно обоснован метод ближней радиолокации проточного тракта ГТД с модуляцией отражённого сигнала с частотой, кратной числу оборотов ротора, предназначенный для вибродиагностики его состояния, и обеспечивающей в своей аппаратной реализации невозмущающий характер контроля, включая невмешательство в конструкцию двигателя.

2. Установлена количественная взаимосвязь возбуждаемого в секции проточного тракта электромагнитного поля с конфигурацией, а также с регулярными и вибрационными перемещениями лопаток турбины и компрессора. Показано, что отмеченные явления, включая поломку одной лопатки, могут быть уверенно зарегистрированы по изменению коэффициента отражения.

3. Предложен новый диагностический параметр – огибающая виброспектра лопаток. Применительно к автодинному преобразованию радиолокационного отклика установлена количественная зависимость амплитуд и расстановки дискретных компонентов спектра от частоты вращения ротора, величины и характера виброперемещения. Обнаружено появление дискретного компонента, свидетельствующего о поломке одной лопатки и/или биений вала.

4. Выявлены специфичные помеховые факторы: флуктуационный и статический нагрев датчика, собственное радиоизлучение плазмы пламени, и отражение сигнала от следующего по потоку рабочего колеса. Уточнена форма спектра и предложены меры снижения помеховых откликов, путём повышения зондирующей частоты до 28-37,5 ГГц, и модификации конструкции датчика, а также детекторного блока.

5. В качестве критерия эффективности (контролеспособности) автодинной диагностической радиосистемы предложена и вычислена её информационная производительность (по Шеннону).

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ радиолокационной функциональной (полётной) диагностики ротора ГТД, включающий возбуждение в секции проточного тракта (турбины высокого давления) электромагнитного поля, преобразование изменений его структуры в изменение коэффициента обратного рассеяния, и далее, в автодинный радиолокационный отклик.
2. Установление численным методом моделирования в электродинамике трёхмерной структуры поля, как функции конфигурации элементов конструкции, в частности, регулярного и вибрационного перемещения лопаток турбины при различных зондирующих частотах гигагерцового диапазона.
3. Физическая и математическая модели автодинного лоатора. Результаты анализа динамического режима, включающего определение формы огибающей спектра частотного автодинного отклика.
4. Результаты сопоставления величины и спектров откликов по пункту 3 для известных и предложенных автором схем, и конструкций автодинных лоаторов.
5. Принцип оценки эффективности названных лоаторов по информационной производительности по Шеннону, т.е. с учётом помеховых воздействий со стороны рабочего процесса ГТД.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы состоит в оперативном выявлении в условиях полёта и на предаварийной стадии приблизительно половины из известных неисправностей ГТД, что способствует повышению безопасности полётов и продлению ресурса узлов ГТД. Опыт разработки и испытаний, подобных по конструкции датчиков параметров пламени в камерах сгорания жидкостных реактивных двигателей показал их достаточную устойчивость к агрессивным воздействиям.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что разработанная теория работы автодинов обеспечивает возможность создания систем и устройств на их основе с улучшенными параметрами и характеристиками, что является вкладом в прикладных областях науки и техники. Кроме того, ценностью работы является распространение численного метода моделирования в электродинамике в среде ФЕКО, предназначенного для проектирования сложных антенн, на выявление отклика в системе ближней (ближнепольной) радиолокации.

Реализация результатов работы. Результаты исследования внедрены в разработку в ООО «НПП «МЕРА» (г. Москва) и использованы в учебном процессе в ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» в виде лабораторной работы «Исследование автодинного приёмопередатчика БРЛ» и в двух дипломных проектах.

Публикации и апробация. Основные результаты диссертации представлялись на следующих конференциях: Международная молодёжная конференция «Туполевские чтения», г. Казань (2005, 2006, 2007 г.); 20th European Time and Frequency Forum, Braunschweig, Germany (2006); 13-я международная молодёжная научная конференция «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж (2007 г.); 13-я международная молодёжная научно-техническая конференция студентов и

аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», г. Москва (2007 г.); VI Международная научно-техническая конференция «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», г. Казань (2007 г.); Международная научно-техническая конференция «Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы», г. Курск (2009, 2011 г.), 28th European Time and Frequency Forum, Neuchatel, Switzerland (2014); Международный симпозиум «Надёжность и Качество», г. Пенза (2014 г.); 24'th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2014), Sevastopol, Crimea, Russia.

Основные результаты опубликованы в 16 печатных работах, в том числе в 2 статьях (в ведущем рецензируемом журнале); в 5 трудах и материалах конференций, в 7 тезисах докладов, в 1 патенте РФ на полезную модель, в 1 патенте России на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и одного приложения. Она изложена на 192 страницах и содержит 49 рисунков, 4 фотографии, 11 таблиц. Список литературы включает 111 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложены основные понятия, цели, задачи, виды диагностирования, требования к средствам технической диагностики авиационных газотурбинных двигателей, а также раскрыто содержание используемых обычно в авиации терминов.

Подчеркнуто, что информационно-измерительной системой диагностирования в авиации называют совокупность объекта диагностирования, соответствующих средств и исполнителей (экипажа). Основные виды диагностирования: тестовые (стендовые) и функциональные (полётные).

Перечислены основные трудности в функциональной диагностике, обусловленные недостаточной контролепригодностью современных ГТД и малой контролеспособностью диагностических средств.

В **первой главе** отмечено, что работа ГТД характеризуется сложным взаимодействием его систем, среди которых главенствующую роль играет проточный тракт, включающий компрессор, камеру сгорания и турбину. Большинство отказов ГТД связано именно с этим трактом, а их последствия приводят к наиболее тяжелым лётным происшествиям.

Общий перечень неисправностей ГТД включает 30-40 позиций, они обуславливают либо постепенные, либо внезапные отказы. Причины отказов: механические повреждения, деформации, износ, обледенение, прогар жаровых труб и лопаток рабочих колёс, разбандажирование, закоксованность. Эти причины имеют свои диагностические признаки.

Автор диссертационной работы разделяет распространённую концепцию авиаспециалистов, что *при диагностике ГТД, и вообще тепловой энергетической установки (ТЭУ), измерение одного физического параметра одного узла одним датчиком не даёт достаточной информации ни о состоянии узла, ни даже о*

параметре; диагностирование должно быть многоканальным, с последующей совместной обработкой извлечённой информации. При этом в функциональной диагностике необходимы специально разработанные быстродействующие алгоритмы, обеспечивающие оперативность в принятии решений.

Последнее обстоятельство вынуждает осуществлять непрерывное сравнение текущих значений параметров с номинальными (полученными на стенде и в опыте эксплуатации), а также разделять отклонения от нормы на допустимые и недопустимые. Поэтому диагностический комплекс летательного аппарата реализован как совокупность многоканальных систем с многоэтапной обработкой информации, извлечённой датчиками в реальном времени.

Практика эксплуатации ГТД и исследования названных учёных показала, что большинство неисправностей может быть обнаружено по изменению огибающей вибрационного и виброакустического спектра.

Вибросостояние ГТД авиаспециалисты характеризуют виброчастотами $F \in (12 \dots 1800) \text{ Гц}$ (некоторые исследователи расширяют верхний предел до десятков килогерц), амплитудами $A \in (0,007 \dots 1,0) \text{ мм}$, виброскоростями $V \in (30 \dots 90) \text{ мм/с}$, виброускорениями a и коэффициентом виброперегрузок $K_g = a/g \in (0,32 \dots 15)$, где g – ускорение свободного падения.

Наиболее информативным диагностическим параметром является спектр виброскоростей совокупности лопаток компрессора и турбины ГТД. Это обстоятельство позволило Якобсону П.П. установить в стендовых экспериментах 17 дефектов в 8 узлах ГТД, поскольку виброчастоты этих узлов разнесены по спектру. Однако эксплуатируемые вибродатчики сейсмического типа вследствие узкополосности не позволяют охватить такой спектр, и для функциональной диагностики непригодны.

Известные методы ближней радиолокации свободны от названного недостатка, но неприменимы в тесном объёме проточного тракта и вследствие многофакторных и нетрадиционных для радиотехники помех.

В заключении первой главы сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** описан предложенный автором метод радиолокационной функциональной диагностики проточного тракта ГТД на примере наиболее ответственных и наиболее уязвимых узлов – компрессора и турбины высокого давления (КВД и ТВД). Изучена динамика автодинных датчиков вибраций.

Формирование диагностического отклика осуществляется в полужамкнутой (для электромагнитного поля (ЭМП)) «диагностической камере», образуемой элементами конструкций роторов и статоров компрессора и турбины двигателя. Обобщённая конструкция (для турбины) показана на рисунке 1. «Диагностическая камера» в продольном (по потоку) сечении ограничена внутренним корпусом турбины 1, лопатками соплового аппарата турбины низкого давления (ТНД) 6, корпусом вала 7, а в поперечном сечении лопатками ротора турбины высокого давления 5 и ротора турбины низкого давления 8, образующими полупрозрачные для радиоизлучения стенки – «диагностические окна».

Вибродатчик (ВД) 3, представляющий собой СВЧ антенно-генераторный модуль, установлен в штатном смотровом окне 4. Чувствительным элементом служит невыступающая антенна, раскрыв которой расположен заподлицо с внутренней поверхностью внутреннего корпуса 1.

В ходе рабочего процесса лопатки турбины поочередно проходят через возбужденное антенной 1 (рисунок 2) электромагнитное поле (ЭМП), искажая его структуру. Антенна отзывается изменением комплексной проводимости. Это изменение влияет на режим СВЧ автогенератора, состоящего из активного элемента 3 (диод Ганна или лавинно-пролётный диод) и резонатора 2.

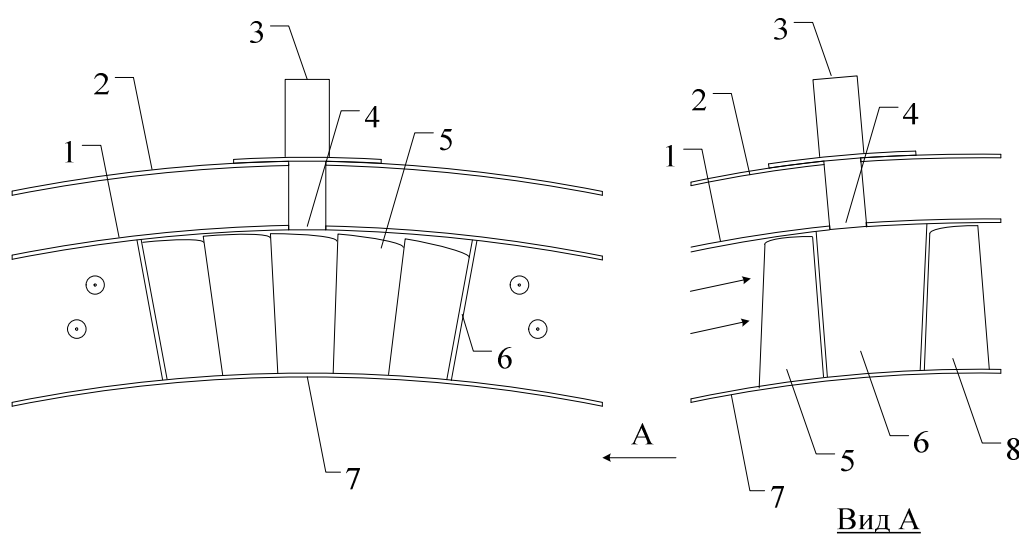


Рисунок 1 – Поперечное и продольное (вид А) сечения «диагностической камеры»

1. Внутренний корпус; 2. Наружный корпус; 3. Вибродатчик; 4. Смотровое окно; 5. Лопатка ротора ТВД; 6. Лопатка соплового аппарата; 7. Корпус вала; 8. Лопатка ротора ТНД

В первом варианте конструкции ВД (рисунок 2, а) антенна (кольцевая щель) непосредственно врезана в торец коаксиального резонатора и её комплексное сопротивление изменяет частоту генерации, по величине которой судят о параметре диагностируемого объекта.

Во втором варианте (рисунок 2, б) идентичная по параметрам антенна вынесена и сообщается с резонатором отрезком коаксиальной линии передачи – фидером 4. Здесь применён автодинный принцип преобразования: излучённый генерируемый сигнал отражается от исследуемого объекта и влияет на режим (амплитуду и частоту) генератора. Достаточная длина отрезка 4 обеспечивает защиту диода от перегрева из-за влияния нагретого двигателя.

Электрическое питание диода и выход сигнала осуществлены через один высокочастотный разъём 5.

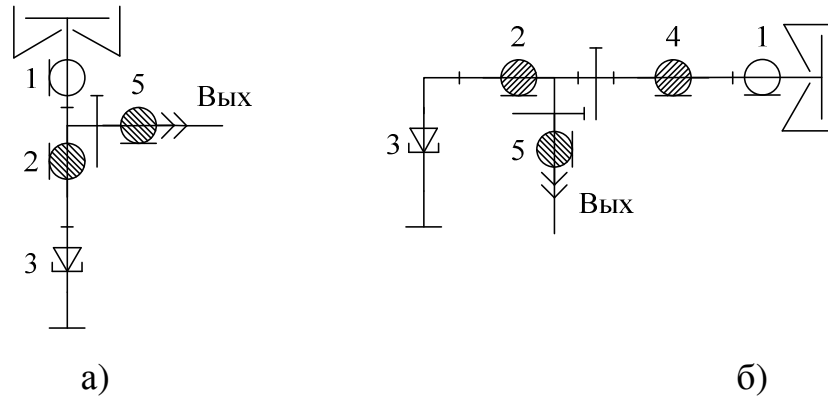


Рисунок 2 – Обобщённые принципиальные схемы вибродатчиков компрессора (а) и турбины (б): 1. Антенна; 2. Резонатор; 3. Активный элемент (СВЧ диод); 4. Линия передачи (фидер); 5. Разъём питания и выхода сигнала

Измерительное преобразование происходит в последовательности:

$$[l + \delta l](x, y, z) \rightarrow \delta \vec{E}(x, y, z) \rightarrow \delta i_A \rightarrow \delta \dot{y}_A \rightarrow \delta \dot{\Gamma}_A \rightarrow \delta \omega \quad (1)$$

Здесь первое состояние условно отображает совокупность номинального l и вибрационного δl движения лопатки в пространстве координат (x, y, z) , $\delta \vec{E}$ – возмущение структуры ЭМП, вызывающее, в свою очередь, изменение токов i_A и комплексной проводимости антенны $\dot{y}_A = g_A + jb_A$. Откликом является изменение частоты генерации $\delta \omega$. В автодинном ВД имеет место промежуточная операция – изменение амплитуды Γ и фазы η коэффициента отражения от исследуемого объекта с последующим автодинным эффектом $\delta \omega$.

Первый вариант обладает лучшей чувствительностью. Вторым обладает лучшей эрозионной стойкостью, обеспечивает термозащиту диода и соответственно предпочтителен для турбины. Поэтому они применяются соответственно в вибродиагностике компрессора (ВДК) и турбины (ВДТ).

Дальнейшее содержание главы 2 состоит из двух разделов. В первом проанализирован процесс формирования измерительного отклика антенны в виде коэффициента отражения, во втором – формирование зондирующего колебания, совпадающего по структуре с диагностическим радиосигналом (откликом). То и другое осуществлено в квазистатическом приближении.

Парциальный импульсный отклик на каждую из лопаток формируется при её движении в пределах диагностического окна. Его форма зависит от конфигурации и вибросостояния, а также целостности лопатки.

Средой анализа отклика антенны (рисунок 3) на поступательное движение и состояние лопаток (в нашем случае имитировался газозоудный тракт ТВД двигателя Д-36) была выбрана программа по ЭМ моделированию FEKO (FEldberechnung bei K"orpern mit beliebiger Oberfl"ache).

На основе методики FEKO построена и качественно оценена трёхмерная структура электромагнитного поля в объёме диагностической камеры, а также поверхностные токи на антенне при квазистатическом вращении ротора. Однако

практический интерес представляет изменение коэффициента отражения. Поэтому наряду с FEKO-анализом и для повышения достоверности, данный этап рассчитан также на основе теории цепей.

Амплитуда и фаза коэффициента отражения:

$$\Gamma = \frac{\sqrt{(1 + \alpha_1^2)^2 - 2 \cdot \alpha_2^2 \cdot (1 - \alpha_1^2) + \alpha_2^4}}{(1 + \alpha_2^2)^2 + \alpha_1^2} \quad (2)$$

$$\eta = -\arctg \frac{2 \cdot \alpha_1}{[1 - \alpha_1^2 + \alpha_2^2]}$$

где $\alpha_1 = b_A/g$, $\alpha_2 = g_A/g$, g_A , b_A – активная и реактивная проводимости антенны (подверженные влиянию диагностируемого процесса), g – проводимость фидера.

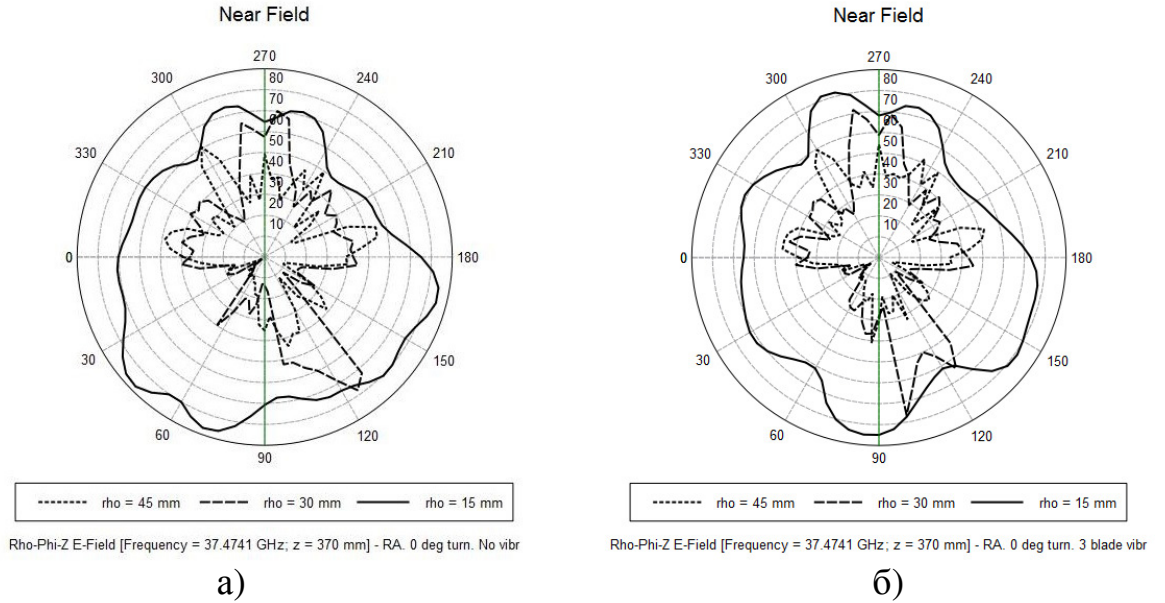


Рисунок 3 – Картины электромагнитных полей вблизи (в срезах на различных отдалениях от центра) круглой антенны датчика при отсутствии вибраций лопаток (а) и при вибрации одной из лопаток (б)

Решение нелинейного дифференциального уравнения автодина даёт диагностический (частотный) отклик в виде:

$$\delta\omega \approx -\Gamma_0 \cdot \Pi \cdot (\delta_\eta \cdot \cos \eta_0 + \delta_\Gamma \cdot \sin \eta_0) \quad (3)$$

где Π – прочность предельного цикла, Γ_0 , η_0 – значения амплитуды и фазы комплексного коэффициента отражения в рабочей точке с учётом фазовой задержки в фидере, δ_Γ , δ_η – относительные вариации.

В диссертационной работе установлены и выборочно представлены на рисунках 3, 4 формы импульсных откликов на вращение ротора с исправной (непрерывная линия), вибродеформированной (штрих-линия) и сломанной лопаткой (штрих-пунктир) в пределах «диагностического окна». Конкретным объектом служила первая ступень турбины высокого давления двигателя Д-36. Аргументом функции комплексного коэффициента отражения является угол поворота ротора на ширину «диагностического окна». Результаты получены для

двух типов антенн: известной в подобном применении – кольцевой-щелевой антенны (КЩА) (см. рисунок 3) и круглой антенны (КА) в виде открытого конца круглого волновода (см. рисунок 4).

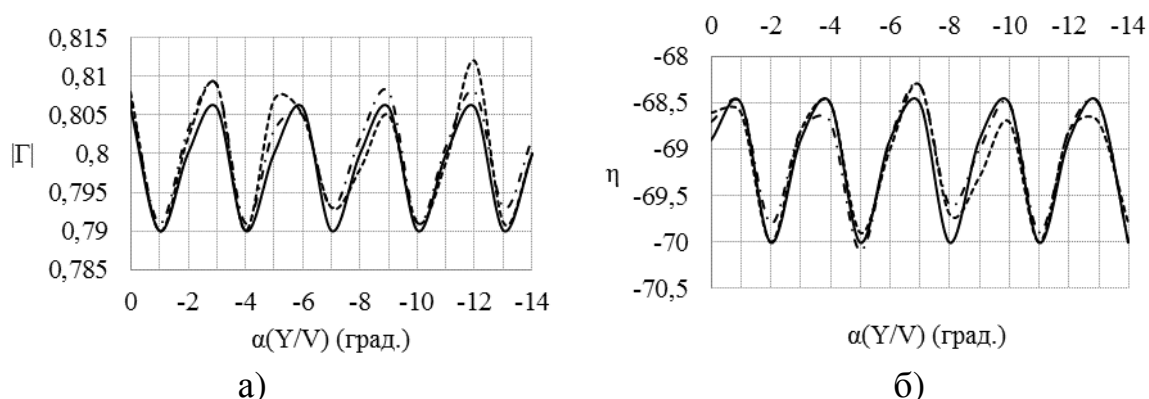


Рисунок 4 – Отклик по изменению амплитуды (а) и фазы (б) комплексного коэффициента отражения кольцевой-щелевой антенны на перемещение группы лопаток при их различных состояниях

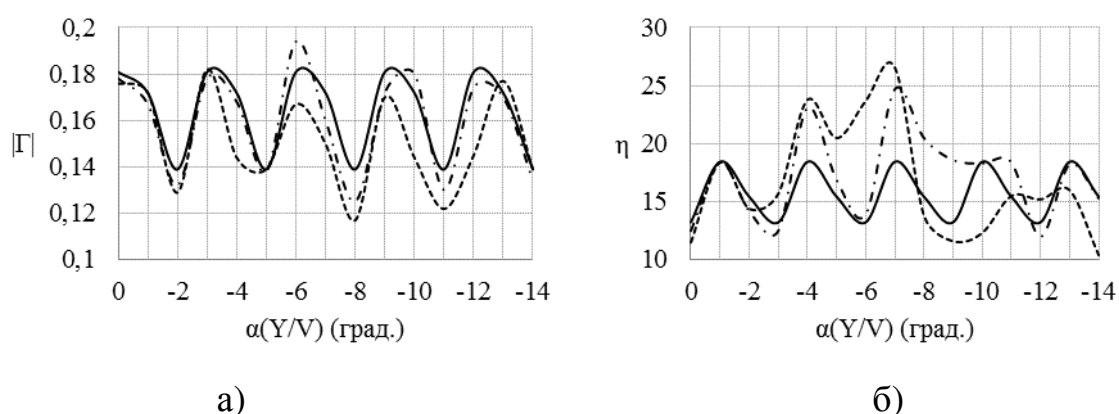


Рисунок 5 – Отклик по изменению амплитуды (а) и фазу (б) комплексного коэффициента отражения круглой антенны на перемещение группы лопаток при их различных состояниях

Проведённые количественные оценки частотного отклика датчиков показали возможность выявления аномалий в спектре сигнала датчика со встроенной антенной. Для автодинного варианта (с выносной антенной) отклик существенно меньше, но отмечен его рост по мере расширения щели, и вместе с этим, активной проводимости, и излучения собственно КЩА. Однако наиболее существенный рост амплитуды и фазы отклика достигается с ростом зондирующей частоты до 28...37,5 ГГц. За счёт выбора длины фидера (порядка $2,5\lambda$) форма частотного отклика соответствует форме фазового отклика, и составляет единицы килогерц – для КЩА (рис. 3), сотни килогерц – для КА (см. рис. 4).

На основании выявленных свойств, предложен новый схемно-конструктивный вариант датчика с антенной в виде открытого конца круглого волновода. ФЕКО-моделирование показало его преимущество по чувствительности.

В **третьей главе** изучена динамика формирования отклика в динамике рабочего процесса ГТД. Здесь спектр процесса характеризуется двумя кратными частотами: вращение ротора F_B и парциальных (на каждую лопатку) откликов $F_H = k \cdot F_B$, где k – число лопаток на данной ступени. Соответствующие квазигармонические компоненты радиочастотного спектра модулированы искомым вибропроцессом и помехами. При этом модуляция регулярными процессами (F_B и F_H) – частотная, а вибрациями – амплитудная. Радиочастотный диагностический алгоритм основан на компьютерном анализе формы огибающей наблюдаемого спектра и её сопоставлении либо с идеальным (рассчитанным аналитически), либо с допустимым (полученным на основе статистических испытаний на стенде). В ходе составления радиочастотный сигнал (его спектр на рисунок 6, а), подвергается сначала частотному, а затем амплитудному детектированию (рисунок 6, б, в соответственно).

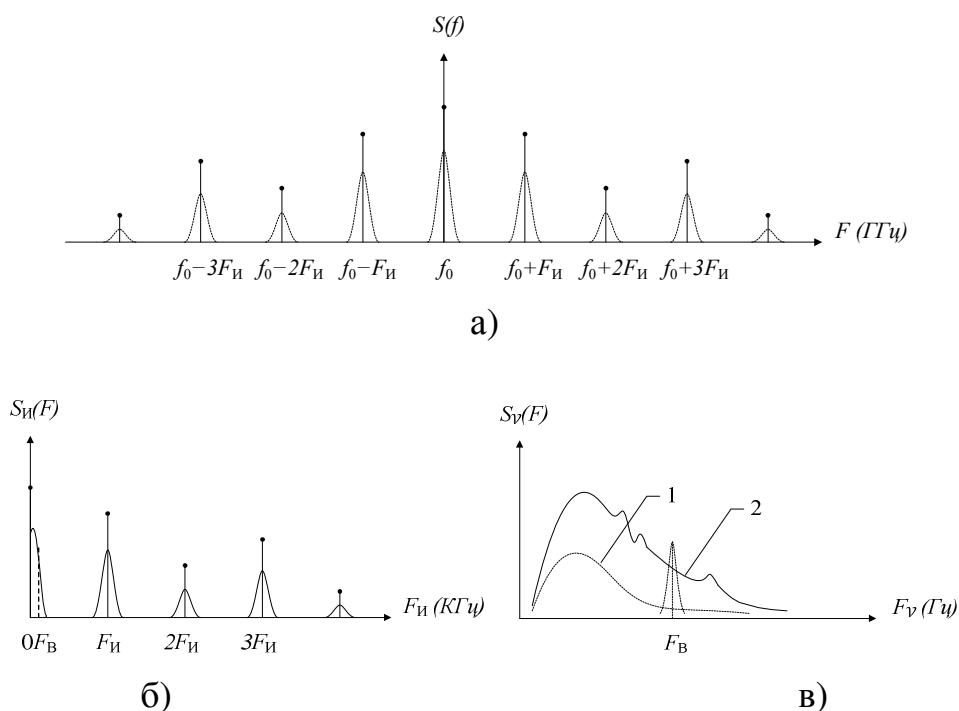


Рисунок 6 – Спектры исходного радиочастотного сигнала (а) автодина и низкочастотных диагностических сигналов на выходе частотного (б) и амплитудного (в) детекторов при наличии допустимой (кривая 1) и аномальной (кривая 2) амплитуды вибрации

Радиочастотный спектр диагностического сигнала симметричен и представлен на рисунке 6, а. Число и величина побочных спектральных компонентов определяется формой импульсов, а та, в свою очередь – формой лопатки. В идеале (лопатки идентичны и не вибрируют, а вал вращается равномерно) спектр

дискретен и ширина спектральных линий определяется шумами аппаратуры (датчика).

Диагностический алгоритм далее, основан на компьютерном сопоставлении в реальном времени огибающих выявленных спектров (рисунок 6, б, в), с их номинальными по дисперсии и форме огибающей, или допустимыми значениями (полученными на основе статистических данных при стендовых испытаниях).

Спектр рабочего процесса, приведённый в качестве примера на рисунке 6, б содержит три диагностических признака (таблица 1).

Таблица 1 – Диагностические признаки

Диагностический признак	Вид дефекта
Соотношение амплитуд компонентов	Деформация лопаток
Изменение частотного интервала $F_{\text{и}}$	Неравномерность вращения вала, проскальзывание
Появление компонента $F_{\text{в}}$ (пунктир)	1. Биение вала 2. Поломка одной лопатки

Литературных данных, как в отечественных, так и в зарубежных публикациях об использовании этих диагностических признаков автором не найдены.

Амплитудное детектирование выявляет форму огибающей виброспектра (см. рисунок 6, в). Здесь диагностические признаки и соответствующие им дефекты известны, но в функциональной диагностике их выявление и использование весьма ограничено.

Особенность радиолокационного, в том числе автодинного отклика, в том, что в нём присутствуют помеховые факторы, обусловленные изменением проводимости антенны под воздействием концентрации электронов в плазме пламени N , нагрева антенны радиационным тепловым потоком T и радиоприёмом собственного радиоизлучения плазмы E .

Дополнительным помеховым фактором являются продукты корреляции виброотклика с перечисленными факторами.

В целом, спектр автодинного отклика представлен в виде:

$$S_A(\Omega) = K_{\Sigma}^2(\Omega)S_{\Sigma}(\Omega) + \left\{ \sum_i K_i^2(\Omega)S_i(\Omega) + S_{\Sigma i}(\Omega) \right\} = S_{\Sigma}(\Omega) + S_{\Pi}(\Omega) \quad (4)$$

где $K_{\Sigma,i}(\Omega)$ – комплексные (частотнозависимые) чувствительности ВД по отношению к факторам $i = N, T, E$, $S_i(\Omega)$ – их спектры, $S_{\Sigma i}(\Omega)$ – обобщенное представление совместных спектральных плотностей коррелированных откликов, $S_{\Sigma,\Pi}(\Omega)$ – условное представление спектров полезного и помехового компонентов сигнала, $\Omega = 2\pi \cdot F_{\Sigma,i}$.

Помеховые отклики коаксиальных датчиков, изучены коллегами автора по научной группе, ими же предложены системные, схемотехнические и конструктивные методы уменьшения чувствительностей $K_i(\Omega)$.

В диссертационной работе при решении нелинейного дифференциального уравнения автодина найден спектр радиочастотного автодинного отклика:

$$S_{\omega}(\Omega) = \frac{\omega^2}{4} \cdot \left\{ K_C^2(\Omega) \cdot S_{\eta}(\Omega) + \frac{K_S^2(\Omega)}{1 + \Omega^2/\Pi^2} \cdot S_{\Gamma}(\Omega) \right\} \quad (5)$$

где $K_C^2(\Omega) = \frac{1}{1 + \frac{\Omega^2}{\Pi_A^2 \cdot \cos^2 \eta}}$, $K_S^2(\Omega) = \frac{1}{1 + \frac{\Omega^2}{\Pi_A^2 \cdot \sin^2 \eta}}$, $S_{\Gamma, \eta}(\Omega)$ – спектральные плотности амплитуды и фазы отражения от антенны, Π – прочность предельного цикла свободного автогенератора, $\Pi_A = \frac{1}{\tau_A}$ – полоса автодинного режима, τ_A – постоянная времени установления. Для ВД $\Pi_A \sim 10^{-3} \dots 10^{-5} \cdot f_0$, поэтому при гигагерцовых зондирующих частотах f_0 диагностическая полоса существенно превышает ширину виброспектра.

Показано также, что корреляционные компоненты спектра $S_{\text{vi}}(\Omega)$ узкополосны и низкочастотны, и поэтому слабо влияют на качество диагностирования.

Четвертая глава включает три раздела: описание двухканального варианта запатентованной диагностической системы (ДДС), оценку её контролеспособности и результаты экспериментов – натурального и имитационного.

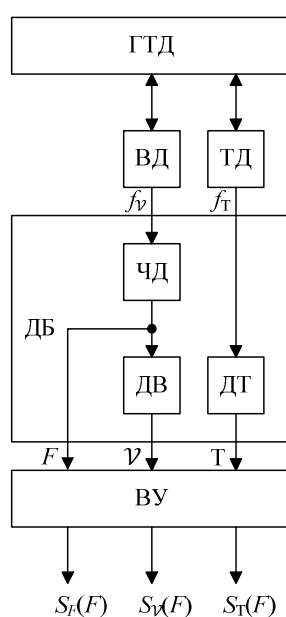


Рисунок 7 – Двухканальная диагностическая система

ДДС (рисунок 7) состоит из датчиков вибраций и температуры (ВД и ТД), детекторного и вычислительного блоков (ДБ, ВБ). В ДБ входят частотные детекторы радиосигналов вибраций и температуры, а также амплитудный детектор рабочей частоты F_H .

Предполагается, что оба датчика кроме основного параметра, в какой-то мере, реагируют и на «соседний» – помеховый. На выходах детекторов – частотного (ЧД) и амплитудных (ВД и ТД) сигналы «загрязнены». Линейная межканальная обработка в ВБ позволяет подавить (или значительно ослабить) аддитивные

помехи, а последующая – нелинейная – продукты корреляции. Дифференцирующая цепь (ДЦ) осуществляет переход к спектру виброскоростей.

Контролеспособность системы количественно оценивается *информационной производительностью* (аналогом пропускной способности по Шеннону):

$$W = \sum_{\nu, \tau} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \log_2 \left(1 + \frac{S_c(\Omega)}{S_{\Pi}(\Omega)} \right) d\Omega \quad (6)$$

где $\Omega_{1,2}$ – границы диагностической полосы, $S_c(\Omega) = S_{\nu}(\Omega), S_{\tau}(\Omega)$ – спектры диагностических откликов, $S_{\Pi}(\Omega)$ – совокупность помеховых спектров, включая корреляционные компоненты и собственных шумов в каналах. По мере предусмотренных патентом этапов обработки – линейной, а затем нелинейной $S_c(\Omega)$ и $S_{\Pi}(\Omega)$ изменяются. $S_c(\Omega)$ несколько растёт за счёт корреляционных компонентов, а $S_{\Pi}(\Omega)$ значительно убывает на обоих этапах, в идеале до уровня собственных шумов. Реально этому мешает неточное значение чувствительностей каналов и коэффициентов корреляции.

В просчитанных примерах информационная производительность лежит в пределах $W \approx 2 \cdot 10^3 \dots 10^4$ бт/с.

Предложены новая схема и конструкция вибродатчика с цилиндрическими резонатором и фидером, открытый конец последнего служит антенной. ФЕКО-моделирование установило увеличение фазового (для коэффициента отражения) и частотного (для автодинного отклика) в среднем в десять раз.

Эскиз конструкции предложенного ВД представлены на рисунке 8.

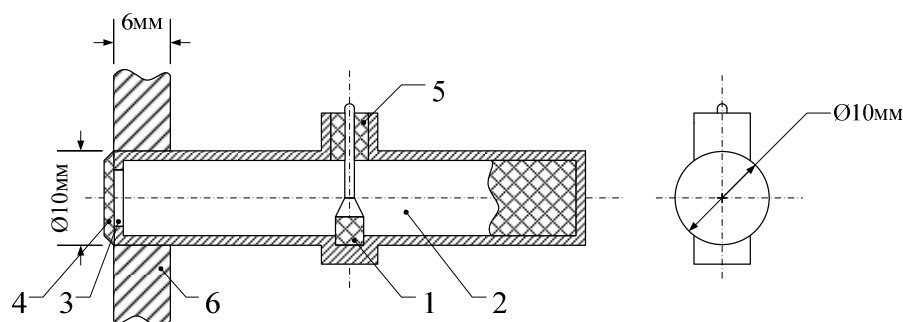


Рисунок 8 – Эскиз конструкции цилиндрического датчика: 1. Генераторный диод; 2. Цилиндрический резонатор; 3. Окно антенны; 4. Диэлектрический обтекатель; 5. Разъём питания и выхода; 6. Стенка наружного корпуса турбины (диэлектрическое заполнение резонатора показано условно только около правого торца)

На рисунке 9 показан образец изготовленного и опробованного на стенде вибродатчика, устанавливаемого вместо штатной заглушки.



Рисунок 9 – Образец автодинного вибродатчика (слева) и заглушка смотрового окна (справа)

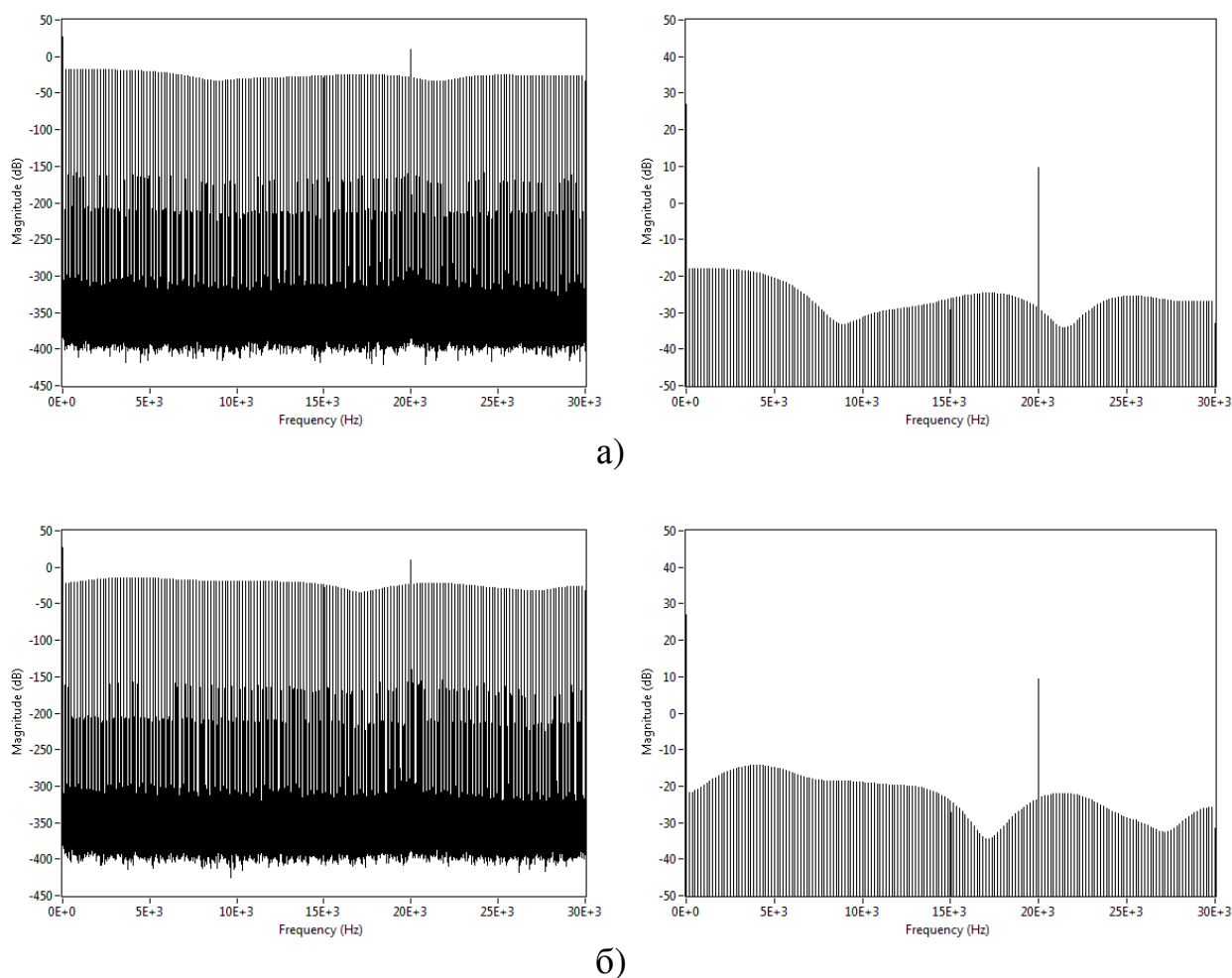


Рисунок 10 – Амплитудные спектры отклика антенны и их огибающие при наличии сломанной лопатки (а) и вибрирующей лопатки (б)

Проведён имитационный эксперимент в среде виртуального программирования Labview. Исследована динамика диагностируемого процесса. Входными данными служили результаты, полученные FEKO-моделированием. Получены

амплитудные спектры и их огибающие (см. рисунок 10) для нештатных режимов вращения ротора турбины.

В **заключении** представлены основные выводы по работе.

В **приложении** представлена хронология этапов исследований в ФЕКО, таблицы и графики, отражающие подбор оптимальной конструкции антенно-волноводного модуля автодинного датчика и её электродинамических параметров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен и разработан способ функциональной диагностики лопаток рабочих колёс ГТД, основанный на непрерывном зондировании ротора СВЧ радиоизлучением, с преобразованием состояния и перемещения лопаток в комплексный коэффициент отражения. Диагностический алгоритм включает автодинное, или автогенераторное преобразование сопротивления в частоту излучения. Диагностическим параметром выбрана форма огибающей спектра радиолокационного отклика, а диагностическими признаками – спектральные плотности отклика на известных участках спектра. При этом использована дискретность спектров, обусловленная отражённого сигнала циклическими процессами в ГТД (с частотой в несколько кГц).

2. В применении к двум типам антенн: кольцевой-щелевой и открытому концу круглого волновода, исследован процесс формирования диагностического отклика при квазистатическом вращении ротора. Количественно оценена амплитуда и фаза коэффициента отражения при регулярном, и вибрационном перемещении лопаток, а также при поломке лопатки. Расчёты произведены с использованием программного продукта численного электромагнитного моделирования ФЕКО.

3. Выбраны схемы и конструкции автодинных вибродатчиков (три варианта), преобразующих регулярные и вибрационные перемещения лопаток (а также их деформации и поломки) в частоту генерации автодина. Проведён анализ динамики вибродатчиков в рабочем режиме ГТД, частотный отклик составляет десятки – сотни кГц, что обеспечивает надёжное обнаружение аномалий. Найдены спектральные характеристики диагностического отклика, установлены диагностические признаки вибраций, деформаций и поломок лопаток, а также проскальзывания, и биения вала. Оценено влияние размеров антенны (радиуса и ширины щели) и зондирующей частоты на величину отклика. Признано, что автодинный датчик с цилиндрическим резонатором и с открытым концом волновода в качестве антенны даёт наилучшие показатели. Изучены спектры помеховых откликов и опробованы предложенные, в более ранних исследованиях, способы их минимизации.

4. Предложен двухканальный вариант запатентованной многоканальной радиолокационной диагностической системы, и исследована её контролеспособность. При этом критериями оценки приняты информационная производительность на особо значимых участках спектра. Установлено, что контролеспособность (по мнению авиаспециалистов) пропорциональна информационной производительности на особо значимых участках виброспектра.

Также установлено, что наиболее существенный рост информационной производительности обеспечивается повышением зондирующей частоты до 28-37,5 ГГц.

5. Разработаны схема и конструкция, изготовлен и испытан образец датчика с цилиндрическим волноводом, конструктивно сопрягаемый с реальными ГТД.

Конструкции и степень контролепригодности современных газотурбинных авиадвигателей, например семейств: Д-436 (Ту-334, Ан-148, Бе-200), ПС-90А (Ил-96, Ту-214, Ил-76), CFM-56 (Boeing 737 Classic, Boeing 737 NG, Airbus A320), CF-34 (Bombardier CL-605, Bombardier CRJ1000 NextGen, Embraer E-195) уже сейчас позволяют без конструктивных изменений ГТД оснастить их диагностическими системами на основе радиолокационных (автодинных) датчиков. Функциональные возможности таких систем в принципе, а после доработки диагностических (компьютерных) алгоритмов, и практически, позволят выявить в условиях полёта, и в доаварийном состоянии до половины неисправностей проточного тракта ГТД.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК:

1. Мирсаитов Ф.Н., Гимадеева Л.А., Болознев В.В. Спектр при радиоволновой вибродиагностике ротора газотурбинного авиадвигателя // Научно-технический вестник Поволжья. № 3, 2013 г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – С. 198-201.

2. Мирсаитов Ф.Н., Сулейманов С.С., Болознев В.В. Способ вибродиагностики ротора газотурбинного авиадвигателя // Научно-технический вестник Поволжья. № 3, 2013 г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – С. 202-205.

Патент РФ и свидетельство на полезную модель:

3. Болознев В.В., Мирсаитов Ф.Н., Сафонова Е.В., Станченков М.А., Сулейманов С.С., Султанов Ф.И. Датчик контроля режима тепловой энергетической установки // Патент России на полезную модель № 77419. 2008.

4. Болознев В.В., Мирсаитов Ф.Н., Сафонова Е.В., Станченков М.А., Сулейманов С.С., Султанов Ф.И. Способ контроля режима тепловой энергетической установки и датчик для его осуществления // Патент России № 2374559. 2009. Бюл. № 33.

Доклады и тезисы в сборниках статей и материалов конференций

5. *Mirsaitov F.N.* Autodyne UHF Sensor of Vibration in a combustion engine // Туполевские чтения: Международная молодёжная конференция, посвящённая 1000-летию города Казани: Материалы конференции (Казань, 10-11 ноября 2005 г.). – Том VI. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 90-91.

6. Autodyne microwave thermosensor under vibrodisturbance influence / *Boloznev V.V., Safonova E.V., Mirsaitov F.N.* [and others] // Proc. of the 20th European Time and Frequency Forum (27-30 March 2006, Braunschweig, Germany). – 2006. – P. 63-67.

7. Мирсаитов Ф.Н. Теплостойкий вибродатчик // XIV Туполевские чтения: Международная молодёжная конференция: Материалы конференции (Казань, 10-

11 ноября 2006 г.). – Том V. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 22-24.

8. *Мирсаитов Ф.Н.* Датчик измерения вибраций в камерах сгорания // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 13 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (Москва, 1-2 марта 2007 г.): Тез. докл.: В 3-х т. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – Т. 1. – С. 27-28.

9. Метод повышения качества автодинного контроля режимов тепловой энергетической установки (ТЭУ) / *Болознев В.В., Сафонова Е.В., Мирсаитов Ф.Н.* [и др.] // Сборник докладов 13-й международной научно-технической конференции (Воронеж, апрель 2007 г.): Радиолокация, навигация, связь. – Воронеж, 2007. – Том I. – С. 157-163.

10. Method of autodyne regime's control refinement in thermal power engine / *Boloznev V.V., Safonova E.V., Mirsaitov F.N.* [and others] // Proc. of 13th International "Radiolocation, navigation, communication" Symposium (Voronej, April 2007). – Voronej, 2007. – Vol 3. – P. 157-163.

11. *Мирсаитов Ф.Н.* СВЧ автодинный датчик измерения вибраций в турбинно-реактивных двигателях // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов VI Международная научно-техническая конференция (Казань, 17-23 сентября 2007 г.): Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под. Ред. *В.А. Неганова* и *Г.П. Ярового*. – Казань, 2007. – С. 274-275.

12. *Мирсаитов Ф.Н.* Частотный отклик автодинного вибродатчика на виброперемещения // XV Туполевские чтения: Международная молодёжная конференция: Материалы конференции (Казань, 10-11 ноября 2007 г.). – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007.

13. СВЧ датчик параметров вибраций в камерах авиационных двигателей / *Застела М.Ю., Болознев В.В., Мирсаитов Ф.Н., Сулейманов С.С.* // Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы. Диагностика-2009: Сб. материалов I-й Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. / ред. кол.: *В.Э. Дрейзин* [и др.]; (Курск, 13-15 мая 2009 г.). – Курск: Курский ГТУ, 2009. Т. 2. – С. 185-187.

14. *Мирсаитов Ф.Н.* Передаточная характеристика СВЧ вибродатчика // Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы. Диагностика-2011: Сб. материалов II-й Междунар. науч.-техн. конф. (Курск, 11-13 апреля 2011 г.). – Курск: Юго-Зап. гос. ун.-т, 2011. – С. 98-100.

15. *Мирсаитов Ф.Н., Застела М.Ю., Болознев В.В.* Радиолокационная вибродиагностика газотурбинного авиадвигателя в условиях полёта // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество»: в 2-х т. – Пенза: ПГУ, 2014. – 2 т. – С. 5-8.

16. *Болознев В.В., Мирсаитов Ф.Н., Носков В.Я.* Сигнальные и шумовые характеристики автодинов в решении задач вибродиагностики газотурбинных двигателей // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014): материалы конф. в 2-х т. (Севастополь, 7–13 сент. 2014 г.) Севастополь: Вебер, 2014. Т. 2. – С. 1019–1022.

Подписано в печать 24.10.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,4.
Тираж 120 экз. Заказ №1674
Отпечатано в типографии ИПЦ УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4